

李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系 [J]. 大气科学, 40 (6): 1199-1214.
Li Minggang, Guan Zhaoyong, Mei Shilong. 2016. Interannual and Interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1199-1214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257.

夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异 及其与环流和 Rossby 波活动的联系

李明刚^{1,2} 管兆勇^{1,3} 梅士龙⁴

1 南京信息工程大学江苏省气象灾害预报预警协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

4 嘉兴市气象局, 嘉兴 314050

摘 要 旱涝异常不仅与降水的频次和强度有关, 在多种时间尺度上, 其与降水的持续性亦存在较好的对应关系。基于 1979~2013 年 6~7 月中国东部 249 站点逐日降水资料及 ERA-interim 逐月再分析资料, 研究了长江中下游地区近 35 年降水持续性的长期变化及其相联系的大尺度环流型和 Rossby 波能量频散特征。结果表明: 近 35 年长江中下游地区降水时段平均持续时间变短而无雨时段变长, 体现出了降水持续性的减弱趋势。进一步研究发现, 该趋势变化与长江中下游地区在 1980 和 1990 年代持续性降水事件偏多, 而在 2000 年以后偏少的年代际变化有关。在年代际和年际尺度上, 与长江中下游地区降水持续特征变异相联系的异常环流型在我国东南部及南海地区分布较为类似, 而在偏高纬度和偏低纬度地区存在较大差异。相似之处在于: 在两个时间尺度上, 在对流层中高层均存在显著的反气旋性环流控制我国东南部地区, 而在中低层均存在由海洋向长江中下游地区的气流辐合, 并在高层由长江中下游地区向海洋辐合。不同之处是: 年代际尺度上, 自对流层低层到高层在乌拉尔山以东及蒙古地区分别存在反气旋性环流和气旋性环流, 且赤道印度洋地区的对流层中低层存在显著的气旋性环流; 而在年际尺度上, 由低层到高层位于贝加尔湖东、西侧均为反气旋性环流异常, 但海洋性大陆的东北部, 低层出现向长江中下游地区辐合的气流的源, 高层则为由长江中下游地区向低纬度地区辐合的气流的汇。Rossby 波扰动能量频散特征在年代际和年际尺度上亦呈现出明显的差异。年代际尺度上, 中纬度地区自大西洋至蒙古地区存在一个正一负一正一负的 Rossby 波列, 波能东传, 对长江中下游地区产生影响, 而在中低层, 自低纬地区向长江中下游地区的波能传播相对较弱; 在年际尺度上, 影响长江中下游地区降水的 Rossby 波活动的局地性特征更为明显。在低层, 波扰能量经由南海向长江中下游地区传播更明显, 而在对流层高层源于贝加尔湖西侧的波扰能量传播相对较强。这些结果有助于深刻认识长江中下游地区降水的异常持续及与之相联系的洪涝灾害的形成机理。

关键词 长江中下游地区 降水持续性 Rossby 波活动

文章编号 1006-9895(2016)06-1199-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257

收稿日期 2015-08-26; **网络预出版日期** 2015-11-19

作者简介 李明刚, 男, 1986 年出生, 博士, 研究方向为气候动力学。E-mail: leemg@nuist.edu.cn

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201406024, 国家自然科学基金项目 41330425, 江苏省研究生科研创新计划项目 CXZZ12_0485, 灾害天气国家重点实验室课题 2015LASW-A03

Funded by Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201406024), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41330425), Creative Program of Science & Technology of Jiangsu (Grant CXZZ12_0485), Creative Program of the State Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2015LASW-A03)

Interannual and Interdecadal Variations of Summer Rainfall Duration over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River in Association with Anomalous Circulation and Rossby Wave Activities

LI Minggang^{1,2}, GUAN Zhaoyong^{1,3}, and MEI Shilong⁴

1 *Jiangsu Province Collaborative Innovation Center for Meteorological Disasters Prediction and Evaluation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *Key Laboratory of China Education Ministry for Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

4 *Meteorological Administration of Jiaxing, Jiaxing 314050*

Abstract Droughts and floods are not only related to abnormal rainfall frequency or intensity, but also associated with the duration of rainfall on multiple timescales. Based on daily rainfall data collected at 249 stations in eastern China and the ERA-interim reanalysis, the long term changes in rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River (hereafter MLRYR) and associated large scale circulation patterns and Rossby wave energy dispersion have been investigated. In the recent 35 years, the average duration of summertime wet spells decreases while that of dry spells increases, indicating a decreasing (negative) trend of rainfall duration over the MLRYR. Further analysis shows that this trend is related to inter-decadal changes in the frequency of persistent rainfall extremes, which is obviously higher in the 1980s and 1990s and lower in the 2000s. The anomalous circulation patterns that describe the inter-decadal and inter-annual changes in rainfall duration over the MLRYR look similar in some regions including Southeast China and the South China Sea, but different between mid- to high-latitudes and lower-latitudes. On both inter-decadal and inter-annual timescales, southeastern China is under control of a notable anticyclonic circulation anomaly in the middle and upper troposphere. The airflow converges into the MLRYR in the middle and lower troposphere and diverges in the upper troposphere with air flowing away from the MLRYR to the ocean. However, associated with inter-decadal changes, an anomalous anticyclonic circulation is located to the east of the Urals while an anomalous cyclonic circulation is found over Mongolia in the lower and upper troposphere. Meanwhile, an anomalous cyclonic circulation can be found over the equatorial Indian Ocean in the middle and lower troposphere. In contrast, on the inter-annual timescale, anomalous anticyclonic circulation can be found on both the east and west sides of Lake Baikal in the lower and upper troposphere. Divergence occurs in the lower troposphere over northeastern Maritime Continent with the air moving towards the MLRYR, whereas convergence develops in the upper troposphere and the air flows away from the MLRYR to lower latitudes. Characteristic Rossby wave propagation and energy dispersion demonstrate significant differences between inter-decadal and inter-annual timescales. On the inter-decadal timescale, a Rossby wave train with alternatively positive-negative-positive-negative geopotential height anomaly can be found in the mid-latitude from the Atlantic to Mongolia. The eastward propagation of wave energy affects the MLRYR. In the mid- and lower troposphere, however, the wave energy dispersion from lower latitudes to MLRYR is relatively weak. On the inter-annual timescale, the Rossby wave activity flux demonstrates more distinct local features. In the lower troposphere, strong wave energy propagates from South China Sea in the lower latitudes to the MLRYR. In the upper troposphere, wave energy dispersion from regions to the west of Lake Baikal to MLRYR is more obvious. These results are helpful for our better understanding of the mechanism for the persistent rainfall anomaly and related droughts/floods over the MLRYR.

Keywords Middle and lower reaches of the Yangtze River, Rainfall duration, Rossby wave activity

1 引言

近几十年来, 一些国家和地区有雨或无雨时段

的持续时间发生了显著变化 (Schmidli and Frei, 2005; Tolika and Maheras, 2005; Groisman and Knight, 2008; Singh and Ranade, 2010; Llano and

Penalba, 2011), 其反映了这些地区降水持续性特征发生了改变, 而降水持续特征的变化又与旱涝异常存在联系。Zolina et al. (2010, 2013) 发现, 欧洲部分地区在总雨日无明显变化的情况下, 雨日的重新分配导致连续有雨和无雨时段平均持续时间均变长, 从而使得干旱和洪涝灾害的发生概率同时增加。在中国范围内, 约以 100°E 为分界, 其以西连阴雨日数有微弱增多趋势, 以东的大部分区域呈减少趋势, 尤其在华北和西南地区, 连阴雨日数显著减少, 持续无雨时段增多 (Qian and Lin, 2005; Bai et al., 2007), 与这些区域的干旱频发相对应。

每年 6、7 月份, 中国东部雨带稳定维持在江淮地区, 即江淮梅雨。梅雨降水强度强、降水过程平均持续天数较长 (于文勇等, 2012), 且存在较大的年际变率, 导致长江中下游地区旱涝灾害频繁 (陈文和杨修群, 2013)。在一些洪涝发生年, 除降水平均强度偏强外, 降水过程持续长且间隔短的特征亦十分明显 (黄荣辉等, 1998; 张小玲等, 2006)。此外, 在夏季的季节内时间尺度上, 长江中下游地区还常发生旱涝急转现象 (吴志伟等, 2006), 其形成与持续无雨时段和持续强降水时段的迅速更替有关 (封国林等, 2012; 沈柏竹等, 2012)。这些亦反映出降水持续特征异常在长江中下游地区旱涝灾害形成中具有不可忽视的作用。

降水的异常持续往往需要有利的大尺度环流背景, 而大尺度环流异常的形成及维持又与 Rossby 波活动存在联系。研究表明, 当长江中下游地区降水异常持续时, 中高纬度地区多有利于引导冷空气南下的阻塞形势存在 (陆尔等, 1994; 林学椿和张素琴, 2000; 平凡等, 2014)、与大气低频活动相联系的低纬度地区暖湿气流明显的输送 (陆尔和丁一汇, 1996; 张庆云等, 2003; Zhu et al., 2003)。中高纬度阻塞形势的长期维持多存在明显的天气尺度波的扰动能量供应 (Hoskins et al., 1983; 吴国雄等, 1994), 而低纬度地区大气低频活动的信号传播又与 CISK-Rossby 波的激发及驱动作用密切相关 (李崇银, 1990; 刘式适和王继勇, 1992; 陈建洲和赵强, 2014)。相比之下, 除了受到台风影响, 中纬度大气中的 Rossby 波活动对长江中下游地区降水异常的作用更为直接 (梅士龙和管兆勇, 2008, 2009; 陶诗言等, 2010; 陈海山等, 2013; Jin et al., 2013)。副热带高空西风急流对 Rossby 波传播起到波导作用 (Hoskins and Ambrizzi, 1993),

亚洲急流中的 Rossby 波能量频散在出口区能够激发出槽 (脊), 从而影响长江流域旱涝 (陶诗言和卫捷, 2006; 陶诗言等, 2010)。亦有工作表明, 长江中下游地区梅雨异常持续时, 对流层上层斜压不稳定波包活动频繁且下游发展明显 (谭本植和潘旭辉, 2002; 梅士龙和管兆勇, 2008, 2009)。

在近几十年全球加剧变暖的背景下 (Hansen et al., 2010), 已有大量工作揭示出我国长江中下游地区降水强度、频次、极端强降水事件等均发生了显著的变化 (Qian and Lin, 2005; Zhai et al., 2005), 亦有一些较近的研究关注了我国东南部地区持续性暴雨/极端降水事件的统计特征、变化趋势及成因等 (如: Tang et al., 2006; 鲍名, 2007; Chen and Zhai, 2013; Wu and Zhai, 2013), 但专门针对降水持续特征变化的分析工作还较少。目前学者们对旱涝灾害的个例分析的工作也多基于降水量值和频次异常进行, 常常忽视降水持续特征异常的作用。本研究分析包括长江中下游地区在内的中国东部地区降水持续特征的变化, 并着重探讨与长江中下游地区降水持续特征年际和年代际异常相联系的大气环流型及 Rossby 波能量频散特征, 将有助于加深人们对于我国东部多尺度上旱涝异常的形成机理的认识。

2 资料与方法

2.1 资料

本文研究时段为 1979~2013 年逐年 6~7 月, 使用的资料包括:

(1) 中国东部地区的 249 个站点的逐日降水资料, 其在研究时段内均无缺测, 范围包括了 110°E 以东除去黑龙江、吉林、内蒙古和台湾四个省份以外的全部省份 (图 1)。该资料取自中国大陆 743 站点逐日资料集 (<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html> [2015-10-25])。

(2) ERA interim 逐月再分析资料 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mode> [2015-10-25]), 使用的变量包括经向风、纬向风、位势高度、比湿等, 水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。

2.2 持续降水时段、无雨时段的定义

关于有雨和无雨日的区分标准目前存在两种做法: 有的学者以 0.1 mm 的逐日降水量作为区分雨日和无雨日的标准 (如: Tolika and Maheras, 2005; Bai et al., 2007); 有的则以 1.0 mm 的逐日降水量

作为区分有雨日和无雨日的标准(如: Qian and Lin, 2005; Schmidli and Frei, 2005; Groisman and Knight, 2008; Zhang et al., 2011)。考虑到 1.0 mm 以下的降水并不明显且易于蒸发消散, 本文采用了后者, 即当逐日降水量大于等于 1.0 mm 时, 定义该日为雨日; 小于 1.0 mm 或无降水时为无雨日。对于各个站点, 自第一个雨日起至最后一个雨日连续 N 日为雨日, 则为一次持续 N 日的降水时段, 同理亦可得到各个持续无雨时段。

基于以上定义可得到逐年 6~7 月各站点总降水天数(无雨日数)、总降水时段(无雨时段)数。由某年降水(无雨日)总天数除以该年降水时段(无雨时段)总数得到该站当年降水时段(无雨时段)平均持续天数。

要说明的是, 在中国气象局的“降水强度等级划分标准”中, 将逐日降水量在 0.1~9.9 mm 区间的降水日定义为小雨日, 而本文中将 0.1~0.9 mm 的降水日划归到了无雨日类别里。二者略有差别。

2.3 波作用通量

本文中使用了 Takaya and Nakamura (2001) 推导出的三维波作用通量诊断 Rossby 波扰动能量传播特征。对于非静止 Rossby 波, 其水平分量在对数气压坐标中由下式给出:

$$W = \frac{p}{2000|\bar{U}|} \times \left[\begin{array}{l} u(v'^2 - \psi'v'_x) + v(-u'v' + \psi'u'_x) \\ u(-u'v' + \psi'u'_x) + v(u'^2 + \psi'u'_y) \end{array} \right]$$

其中, ψ' 为准地转扰动流函数, u' 和 v' 为扰动准地转风, $\bar{U} = (\bar{u}, \bar{v})$ 为基本流场, p 为等压面气压。本文基于逐月经向风、纬向风及位势高度场资料计算了各个等压面上的波作用通量, 其中以 1979~2013 年 35 年 6~7 月平均流场作为基本场, 各年的 6~7 月平均场减去基本场作为扰动场。

3 降水持续特征的气候平均态及长期变化

3.1 降水持续特征的气候平均态及变化趋势

1979~2013 年多年平均 6~7 月降水总日数存在由南向北减少的分布。由图 1a (阴影) 可见, 辽宁东部、华东中南部、湖南西部及两广等地区降水总天数相对较多, 均在 20 日以上, 其中两广地区最多, 绝大多数站点超过 25 日。而我国东部的其他区域相对较少, 均不到 20 日。考虑到西北太平洋热带气旋 (Tropical Cyclones, 简称为 TC) 活动

对我国东南部地区 6~7 月降水存在一定影响, 我们使用 500 km 固定圆方法 (Lau et al., 2008; Nogueira and Keim, 2010; Barlow, 2011; Dare et al., 2012) 对每个站点的每个降水日做了检查。当降水日当日西北太平洋上存在 TC, 且站点与 TC 中心距离小于 500 km 时, 则认为该降水日为 TC 雨日。6~7 月份多年平均 TC 雨日占总雨日的比例上 (图 1a, 点标记), 东南沿海地区 TC 雨日的比例相对较大, 达到 10%, 尤其在广东南部和海南岛地区, 部分站点的 TC 雨日比例超过 15%。相比之下, TC 活动对长江中下游地区降水的影响并不大, TC 雨日比例一般在 1%~5% 左右。

在我国东部地区, 夏季降水持续时间南长北短 (于文勇等, 2012; 江志红等, 2013), 持续性降水的比例由南向北逐渐减小的特征明显 (Bai et al., 2007)。近 35 年平均 6~7 月降水平均持续天数亦符合这种南长北短的特征 (图 1b, 阴影)。在华南地区降水持续天数多在 2.5 日以上, 江南地区多在 2.5~2 日之间, 长江以北地区则多在 2 日以下。降水时段持续时间的变化趋势上 (图 1b, 点标记), 华南地区站点呈较为统一的变长趋势, 而长江中下游地区绝大多数站点为变短趋势。在河南中南部、安徽北部地区降水持续时间亦有变长趋势, 但不如两广地区变长趋势显著。此外, 淮河以北地区站点以变短趋势居多, 仅有小部分站点呈变长趋势, 但增长和减短趋势的站点并未在地域上有明显的区分。

无雨时段的持续时间可以反映出降水过程之间的间隔长短。气候平均 6~7 月无雨时段平均持续时间上 (图 1c, 阴影), 两广及辽宁东部地区持续时间最短, 在 4 日以下; 华北南部, 华东北部及华中地区无雨时段平均持续时间较长, 在 4.5~5 日之间。其中河南、山西南部 and 河北南部持续时间最长, 达 5 日以上。在这一区域, 降水的持续时间短而间隔时间长, 反映出利于发生干旱的降水持续特征; 与之相反, 在两广地区, 降水持续时间长且间隔短, 体现出利于产生洪涝的降水持续特征。趋势变化上, 无雨时段的持续时间在华南地区变短、在长江中下游地区变长, 两个区域内站点的变化趋势的区域一致性亦较好 (图 1c, 点标记)。

降水持续性的变化与总雨日增减和雨日分布规律的改变均存在联系, 但在不同区域, 这种联系有着不同的表现 (Zolina et al., 2010, 2013)。图

1d 和图 1e 给出了东部地区各站点近 35 年 6~7 月降水总天数的变化趋势，仿照 Zolina et al. (2013) 的做法，将无雨时段与降水时段持续时间变化趋势相同的站点（图 1d）和相反的站点（图 1e）作为区分。可以看出，长江中下游地区站点较为一致的降水持续时间变短、降水间隔时间变长（图 1b, c）、总降水日数减少（图 1e），也就是近 35 年间在长江

中下游地区，6~7 月降水的总天数变少导致降水持续性减弱，结合该区域的极端日降水事件的增多趋势（Zhai et al., 2005），提示该区域可能会出现较多短持续高强度的洪涝事件和长持续时间的偏旱时段。相反地，在华南地区则呈现区域性的降水时段持续时间显著变长而间隔变短（图 1b, c），反映出华南地区增多的降水天数（图 1e）导致降水持续

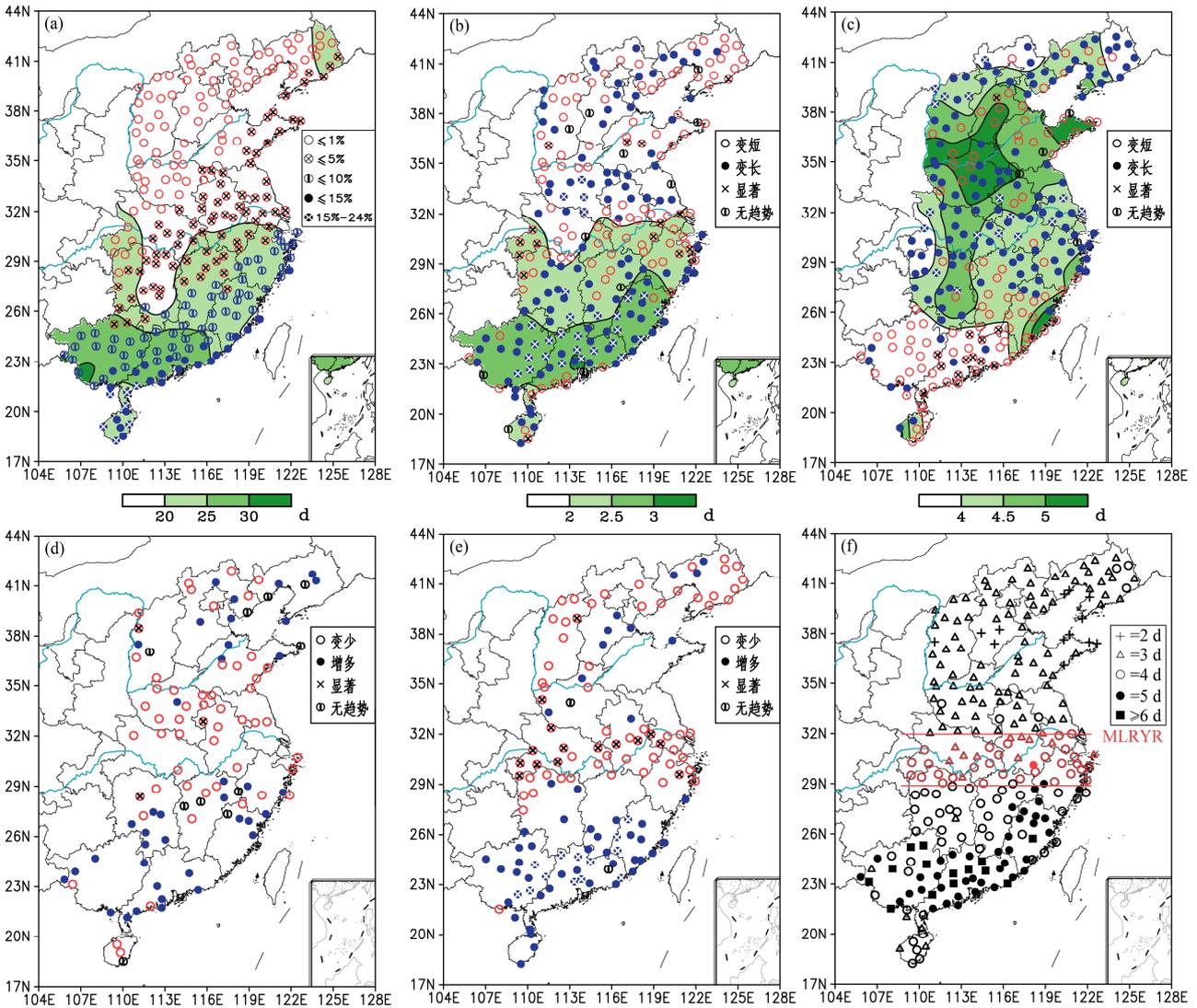


图 1 1979~2013 年平均 6~7 月东部地区 (a) 降水总天数分布 (阴影, 单位: d) 及 TC 雨日比例 (点标记), (b) 降水时段平均持续天数 (阴影, 单位: d) 及其线性趋势 (点标记)。图 (c) 同 (b) 但为无雨时段。图 (d) 和 (e) 均为 1979~2013 年 6~7 月总降水日数的变化趋势, 但 (d) 给出了降水时段和无雨时段持续时间变化趋势相同的站点, 而 (e) 给出了二者趋势相反的站点 (在图 b, c, d 和 e 中, 显著趋势表示通过了 90% 信度的显著性检验)。图 (f) 给出了东部地区各个站点 90% 分位上降水时段 (剔除 TC 雨日后) 持续天数阈值 (单位: d) 及长江中下游地区子区域划分

Fig. 1 (a) Multi-year mean total rainy days (shaded, units: d) and the proportion of TC-related ones (scattered) in June–July over eastern China during the period of 1979 to 2013, and (b) mean duration of precipitation days (shaded, units: d) as well as the linear trends (scattered) of wet spell duration. (c) Same as in (b) but for dry spells. (d) and (e) present linear trends of total rain days in June–July during the period of 1979–2013, but those stations with similar trends of dry and wet spell durations are illustrated in (d) whereas those with opposite trends are shown in (e). In (b), (c), (d) and (e), open circles are for negative trends, closed circles for positive trends, half closed circles for those with no trends, and circles with a cross inside indicate the trends are statistically significant at/above 90% confidence level. The threshold values (units: d) of duration days of wet spells at 90th percentile (after TC-related rain days is removed) are shown in (f) along with the sub-region of middle and lower reaches of the Yangtze River

性加强, 利于产生更多的连阴雨天气及洪涝灾害。注意到, 在河南中南部和安徽北部地区, 降水时段和无雨时段持续时间均变长(图 1b, c), 总雨日减少(图 1d), 反映出雨日分布规律和雨日总数的改变对该区域降水持续特征均产生了影响。降水时段和无雨时段持续时间同时增长会导致旱涝共增, 但总雨日若继续减少将导致这一区域最终会趋于干旱。

针对东部的各个站点, 对 1979~2013 年共 35 年中 6~7 月去除 TC 雨日后的所有降水时段按其降水连续天数进行升序排列, 得到每个站点 90%分位上降水持续天数阈值(阈值的定义方法参照了 Bonsal et al., 2001 的做法)。在长江以北的地区, 绝大多数站点阈值为 3 日(图 1f), 长江以南的湖南、江西和浙江三省份多为 4 日, 90%分位上降水持续天数最长的地区为广东地区, 绝大多数站点达到 5 日, 邻近的福建和广西地区多在 4~5 日, 亦相对较长。这种分布符合我国东部地区降水持续时间由南向北逐渐递减的特征, 即在长江以北, 降水持续时间较短, 以 1~2 天的降水为主, 而在华南地区, 则常发生持续数日的连阴雨。长江中下游地区位于二者之间, 降水持续时间不如华南地区持续长, 亦不像华北地区那样短。

3.2 长江中下游地区降水持续特征的年际及年代际变化

上述分析表明, 长江中下游地区站点降水持续

特征的趋势变化存在较好的区域一致性。基于此, 我们选取了(29°N~32°N)范围内的共 42 个站点(图 1f), 以这 42 个站点的算术平均值作为长江中下游地区的区域平均结果。

近 35 年长江中下游地区 6~7 月降水平均持续天数存在明显的由长变短的长期变化。图 2a 显示, 在 1980 年代和 1990 年代长江中下游地区降水持续时间较长, 两个年代均值分别为 2.22 日及 2.23 日, 均长于 35 年平均值(2.11 日), 其中 1983 年和 1996 年降水平均持续时间超过 2.6 日, 为 35 年中降水平均持续时间最长的两年。自 2000 年代初, 降水平均持续时间由长变短, 年际变率亦变小。这一段时期(2000~2013)内降水平均持续天数为 1.96 日, 明显短于 1980 和 1990 年代, 且亦短于多年平均。因此, 长江中下游地区降水持续时间呈现出显著(显著性水平: $\alpha=0.1$)的变短趋势。

一段时期内, 持续性降水事件的总降水天数多, 可说明该时期内降水的持续性较强, 反之亦然。长江中下游地区的 42 个站点 90%分位上降水持续天数阈值的算术平均值为 3.74, 因此, 本文将 4 日统一为长江中下游地区所有站点的持续性降水事件阈值。对于区域内的每个站点, 当一次降水时段的持续天数大于等于 4 日时, 记为一次持续性降水事件。图 2b 给出了去除 TC 雨日后的长江中下游地区持续性降水事件降水总天数的年际变化。可以看出, 其与降水平均持续时间的变化(图 2a)同步(相

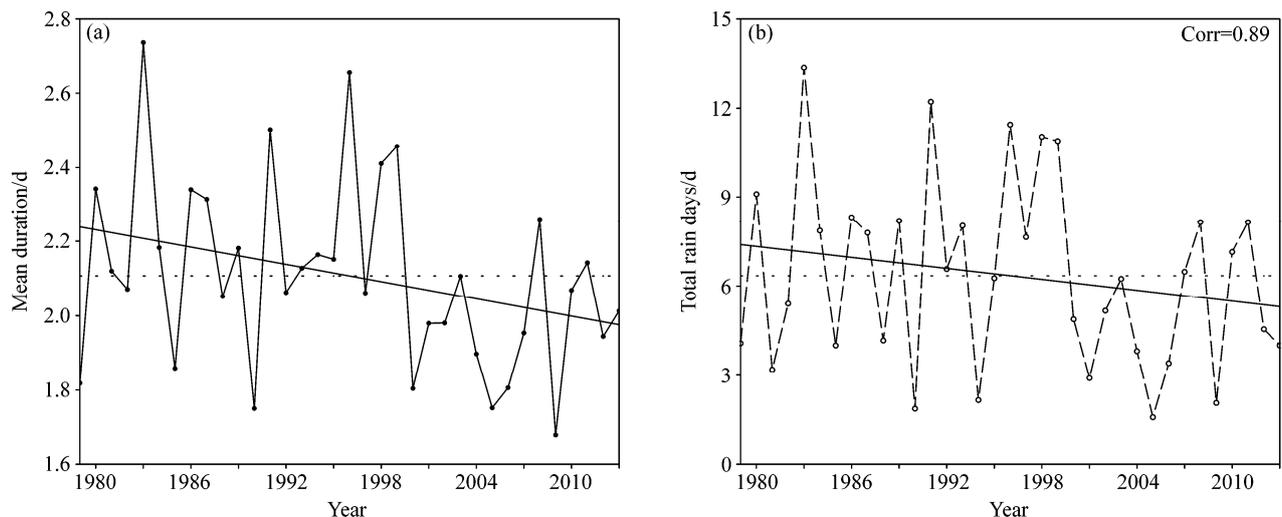


图 2 长江中下游地区区域平均的 6~7 月 (a) 降水平均持续天数的逐年变化(点实线, 单位: d)及线性趋势, (b) 以及持续性降水事件总降水天数的逐年变化(点虚线, 单位: d)及线性趋势

Fig. 2 (a) Inter-annual variability of area-averaged duration of wet spells (solid line with closed circles, units: d) averaged over June–July over the middle and lower reaches of the Yangtze River for the period of 1979 to 2013 and its linear trend, and (b) variability of total rain days (dashed line with open circles, units: d) for persistent rainfall events as well as the linear trend

关达 0.89)，说明持续性降水事件的发生对降水平均持续时间变化的贡献较大。在 2000 年以前持续性降水事件降水总天数较多，这一时段（1979~1999 年）平均为 7.32 日，高于 35 年均值（6.35 日），同时也高于后一时段（2000~2013 年）的均值（4.89 日）。相应地，近 35 年长江中下游地区持续性降水事件降水总天数亦呈减少的趋势，但并不显著。

上述分析揭示出，近 35 年长江中下游地区降水持续特征存在显著的年代际变化。进一步，使用 9 年高斯滤波方法，将长江中下游地区持续性降水事件降水总天数的年际信号和年代际信号进行了分离（图 3a），可以更明显地看出：在 2000 年以前，持续性降水事件的降水总天数处在高值年代，年际变率亦相对较大，年际分量标准化后绝对值大于 1 的年份大多出现在此时段内（表 1），而在 2000 年之后，进入低值年代，年际变率亦变小，年际分量标准化后绝对值大于 1 的年份则相对较少（表 1）。在 Huang et al. (2011) 的研究中，亦指出江淮地区长持续性的降水事件在 2000 年前后由多变少，这与本文结论一致。

6~7 月长江中下游地区持续性降水事件累计降水量值的逐年变化（图 3b）与总天数的变化（图 2b）对应亦较好。持续性降水事件总天数多的年份累计降水量值及其占总雨量的比例亦较大，如 1983、1991、1998 和 1999 年，累计雨量及其占 6~7 月总雨量的比例均分别达到 300 mm 和 45% 以上，远高于 1979~2013 年的平均值（152 mm 和 31%）。

尤其是在 1991 年，累计雨量为 401 mm，占总雨量的比例达到 64%，而这一年持续性降水事件总降水天数为 12.2 日，接近多年平均值（6.35 日）的两倍。

表 1 依据图 3a 确定的年际时间尺度上长江中下游地区 6~7 月持续性降水事件降水总天数的偏多和偏少年份（持续性降水事件降水总天数的年际变化分量标准化值不小于 1 个标准差）

Table 1 Years of anomalous rainfall duration on inter-annual timescale in the middle and lower reaches of Yangtze River identified from Fig.3a (the absolute value of normalized total rain days for persistent rainfall events on interannual timescale must be equal to or larger than one standard deviation)

年份	降水总天数偏多年份及图 3a 年际变化分量标准化值	降水总天数偏少年份及图 3a 年际变化分量标准化值
	1980, 1983, 1991, 1996, 1999, 2008	1.24, 2.21, 2.01, 1.28, 1.14, 1.02
标准化值	1.24, 2.21, 2.01, 1.28, 1.14, 1.02	-1.26, -1.28, -1.86, -1.79, -1.09, -1.01, -1.41

利用时间序列间的相关系数更能够直观地揭示出上述关系。表 2 给出了持续性降水事件总降水天数、累计雨量、降水平均强度之间及其与 6~7 月总降水量之间的相关系数。可以看出，6~7 月总雨量与持续性降水事件总降水天数、持续性降水事件累计雨量的相关系数分别为 0.89 和 0.90，明显高于与降水强度的相关值（0.63），反映出长江中下游地区洪涝灾害的形成与降水异常持续性之间联系密切，即较长持续的降水事件使得累计雨量偏高，

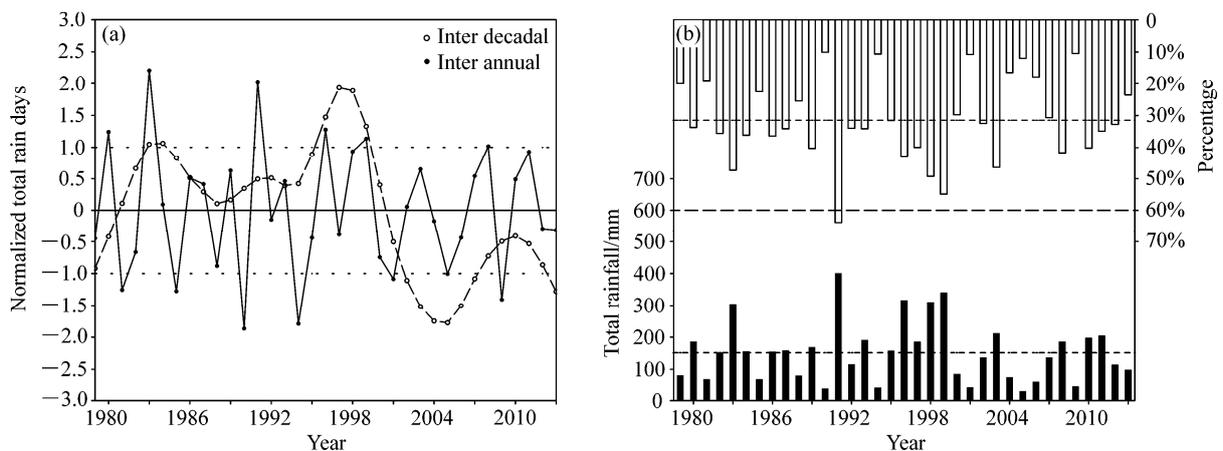


图 3 长江中下游地区区域平均 6~7 月持续性降水事件降水总天数的 (a) 年代际变化分量（空心点虚线）及年际变化分量（实心点实线）的标准化时间序列，以及长江中下游地区 6~7 月持续性降水事件的 (b) 累计降水量（实心柱，单位：mm）及其占总降水量的百分比（空心柱）的逐年变化

Fig. 3 (a) Normalized time-series of total rain days for persistent rainfall events on inter-decadal (dashed line with open circles) and inter-annual (solid line with closed circles) timescales in June–July over the middle and lower reaches of the Yangtze River, and (b) the total rainfall (solid bars, units: mm) for persistent rainfall events in June–July and its percentage (open bars) in the total precipitation amount in June–July

而偏高的累计雨量将易于导致洪涝的发生。

表 2 长江中下游地区持续性降水事件的降水总天数、累计雨量、降水平均强度之间及其与 6~7 月总雨量之间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between total precipitation, total rainy days, precipitation intensity for persistent rainfall events in June–July, and June–July total precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River

	相关系数			
	持续性降水事件降水总天数	持续性降水事件累计降水量	持续性降水事件降水平均强度	6~7 月总雨量*
	持续性降水事件降水总天数	1.00	0.94	0.52
持续性降水事件累计降水量		1.00	0.74	0.90
持续性降水事件降水平均强度			1.00	0.63

注：这里的 6~7 月总雨量指不包括 TC 雨日雨量在内的所有雨日降水量之和。

注意到，在 1990 年代持续性降水事件累计降水量普遍偏高，其中有 7 年高于 35 年均值，尤其是 1991、1996、1998 和 1999 年，持续性降水的累计降水量值均达到 300 mm 以上。结合图 2 和图 3 可知，在 1990 年代降水平均持续时间长且强度大，导致在这一时期长江中下游地区持续性降水极端事件频发 (Zhang et al., 2007; 李明刚等, 2012)，随之引发了多次严重的洪涝灾害 (张庆云等, 2003; 平凡等, 2014)。

4 与降水持续特征变化相联系的环流型

上述分析揭示出长江中下游地区在近 35 年，降水平均持续天数、持续性降水事件的降水总天数及累计降水量均存在显著的年际和年代际变化，且这些指标的变化较为同步。我们以持续性降水事件的降水总天数作为表征降水持续特征的指标，使用 9 年高斯滤波方法对其进行了年际信号和年代际信号的分离。为进一步降低不同时间尺度上信号间的相互干扰，我们对用于分析环流型和波动传播特征的各个分析量亦做了年际信号和年代际信号的分离。在这些工作的基础上，对比分析与长江中下游地区降水持续特征年代际和年际变化相联系的大尺度大气环流型及 Rossby 波活动特征。

4.1 年代际变化

基于持续性降水事件降水总天数的年代际分

量的标准化时间序列 (图 3a)，选取连续为正值的 1982~2000 年这一时段作为偏多年代，连续为负值的 2001~2013 年这一时段作为偏少年代进行合成分析。图 4a~c 分别给出了对流层低 (850 hPa)、中 (500 hPa)、高 (200 hPa) 三层上旋转风场和辐散风场的偏多年代与偏少年代合成差值结果。在对流层低层 (图 4a)，我国东部的长江以南地区受到反气旋性环流控制，其中心在我国东南沿海地区，有利于将南海及西太平洋上的暖湿气流输送到长江中下游地区，并在此形成辐合。在对流层中层 (图 4b)，长江以南地区的反气旋性环流及由低纬度海洋向长江中下游地区的气流辐合均更加明显。相反地，在对流层高层 (图 4c)，在我国东南部地区，气流由陆地向海洋辐合。在长江中下游地区，气流在对流层中低层辐合、高层辐散，这种大尺度条件有利于在该区域产生上升运动及降水的发生与维持。且在水汽输送上 (图 4d)，长江中下游地区存在明显的水汽辐合，源自孟加拉湾和西太平洋的水汽在长江中下游地区汇集，为降水提供充足的水汽源。

注意到，尽管在长江中下游地区存在低层辐合高层辐散的气流，但图 4 显示，在年代际时间尺度上，30°N 以北及东亚/西太平洋区域环流异常在垂直方向上呈现相当正压结构。

4.2 年际变化

基于长江中下游地区持续性降水事件降水总天数年际分量的标准化时间序列 (图 3a)，选取大于 1 的年份作为异常偏多年，小于 -1 的年份作为异常偏少年作合成分析 (具体年份可见表 1)。偏多年份与偏少年份的合成差值辐散风场显示，在对流层中低层 (图 5a、b)，辐散气流由低纬度海洋吹向长江中下游地区，而在高层 (图 5c)，气流由长江中下游地区吹向海洋。旋转风场上，在对流层低层 (图 5a)，长江中下游地区南侧存在显著的反气旋性环流，其中心位于南海上空，东北侧存在气旋性环流，中心在朝鲜半岛上空，这两个异常环流有利于气流在长江中下游地区辐合。随着高度上升，这两个异常环流的中心均向北移动 (图 5b、c)。到了对流层高层 (图 5c)，气旋性环流异常中心移至日本海中部地区，而反气旋性环流异常的中心已移至长江下游地区，使得黄河以南的我国东南部地区全部在异常反气旋性环流的控制下，利于我国东南部大陆上高层的气流辐散。水汽输送上 (图 5d)，由南海和

西太平洋地区向长江流域的水汽输送亦明显。这种大尺度条件亦有利于降水的发生与维持。

在年际时间尺度上，长江中下游地区降水持续性强的时的环流异常与年代际的有相同之处，亦存在不同。相似之处在于：在对流层中高层，两者均存在显著的反气旋性环流异常控制中国东南地区，在中低层则存在气流由海洋向长江中下游地区辐合而在高层由长江中下游地区向海洋辐合的特征（图

4、5）。

然而在较高纬度和较低纬度地区，引起长江中下游地区年代际和年际尺度上降水持续特征异常的环流型存在较大区别。在中高纬度，与长江中下游地区降水持续特征年代际异常的相联系的环流场上，对流层的低、中、高层（图 4a-c），在蒙古地区均存在显著的气旋性环流异常，在其西侧至乌拉尔山区域，存在一个反气旋性环流异常。而与年

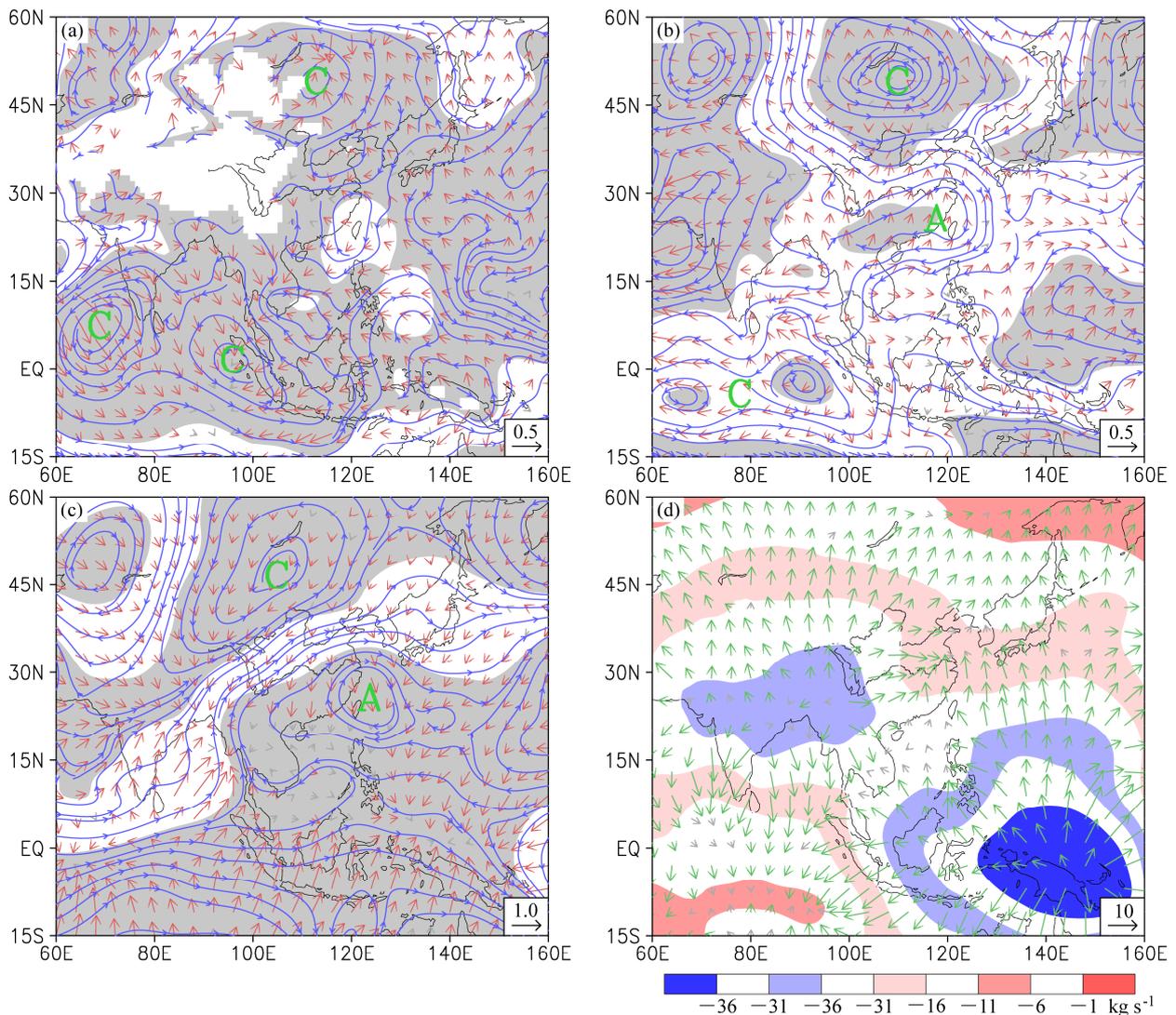


图 4 长江中下游地区持续性降水事件总降水天数多、寡年代 (a) 850 hPa、(b) 500 hPa、(c) 200 hPa 高度上差值合成的旋转风场（阴影区表示通过 95%信度 t 检验）和辐散风场（红色粗箭头表示通过 95%信度 t 检验，单位： m s^{-1} ）以及 (d) 差值合成的整层（1000~200 hPa）积分水汽通量速度势（阴影，单位： 10^6 kg s^{-1} ）及辐散分量（矢量场，绿色粗箭头表示通过 95%信度 t 检验，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）

Fig. 4 Composite differences in anomalous circulations at (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa and (d) the water vapor fluxes integrated from the earth surface up to 200 hPa between years with extremely high and low values of total rain days for persistent rainfall events on inter-decadal timescales. In (a), (b), and (c), streamlines indicate the rotational components and the shaded areas indicate the difference is statistically significant at/above 95% confidence level based on t test. The arrows represent divergent components (units: m s^{-1}) and the red ones indicate they are statistically significant at/above 95% level of confidence. In (d), the shaded contours denote velocity potential (units: 10^6 kg s^{-1}) of anomalous water vapor fluxes while vectors display the divergent components of the vapor fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and the green vectors indicate they are statistically significant at/above 95% confidence level

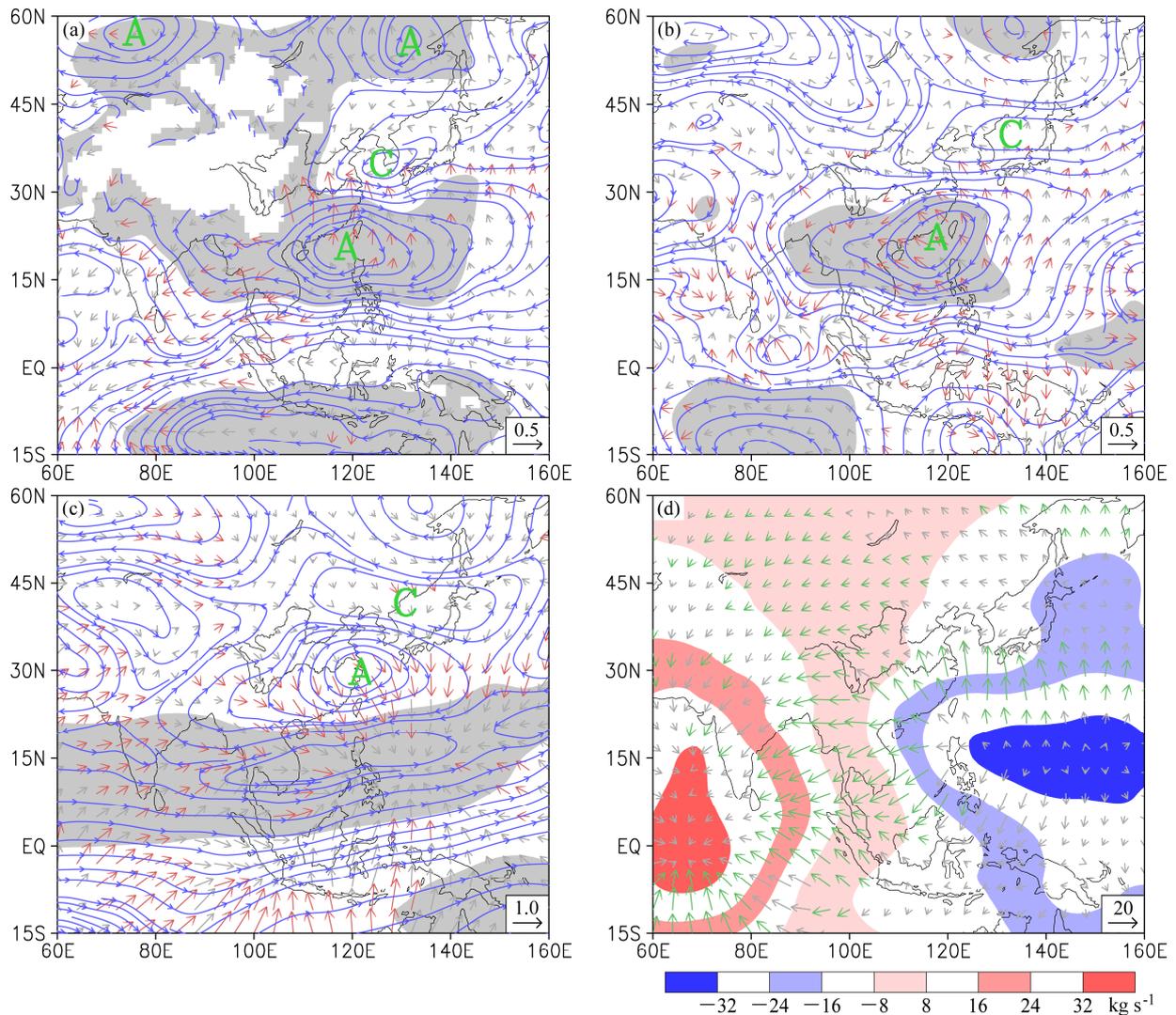


图 5 同图 4，但为年际时间尺度
Fig. 5 Same as in Fig. 4, but for inter-annual timescale

际变化相联系的环流场上，由低层到高层（图 5a-c），在贝加尔湖东、西侧各存在一个显著的反气旋性环流中心，指示阻塞高压对长江中下游地区降水异常持续具有重要作用。在低纬度地区，其差异主要体现在赤道印度洋及海洋性大陆区域。与年代际变化相联系的环流场上，对流层中低层赤道印度洋地区存在显著的气旋性环流，反映了印度洋地区海温与长江中下游地区降水在长时间尺度的变化上存在一定的联系（Yang and Lau, 2004）。而在年际尺度的合成差值场上，海洋性大陆东北部在低层为向长江中下游地区辐合的气流的源，高层为长江中下游地区向低纬度地区辐合的气流的汇。亦有研究表明，当长江中下游地区冬春持续干旱少雨时，

受到海洋性大陆区域在低层辐合高层辐散的异常环流型的持续控制十分显著（Jin et al., 2013），这说明海洋性大陆区域环流异常与长江中下游地区降水持续特征年际变化存在密切联系。

5 与降水持续性异常相联系的准定常 Rossby 波活动

包括长江中下游流域在内的东亚地区夏季降水异常与 Rossby 波活动存在的紧密联系已被许多工作所揭示（Guan and Yamagata, 2003; Huang, 2004; 施宁等, 2009; 金大超等, 2010; Huang et al., 2012）。图 6a-c 给出与长江中下游地区降水持续性年代际异常相联系的 Rossby 波能量在不同等压面

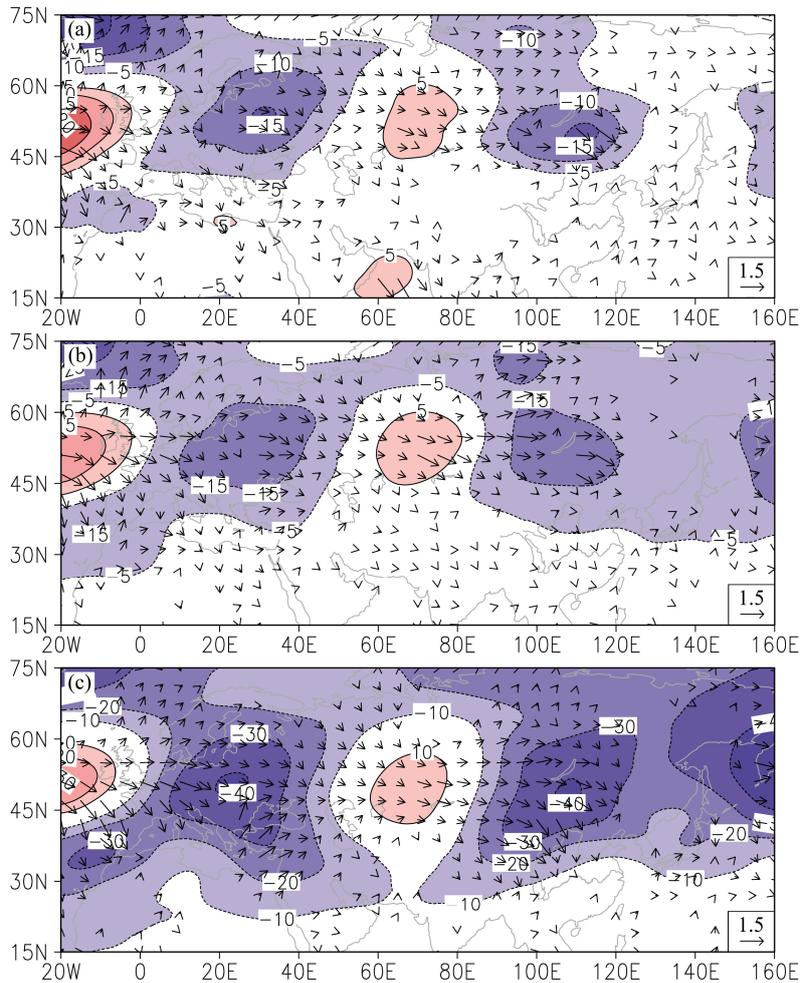


图 6 长江中下游地区持续性降水事件总降水天数多、寡年代 (a) 700 hPa、(b) 500 hPa、(c) 200 hPa 高度上位势高度场的合成差值 (阴影, 单位: gpm) 及相应的波作用通量 (矢量, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

Fig. 6 Composite differences in geopotential height (shades, in gpm) and wave activity fluxes (vectors, in $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) at (a) 700 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa between years of extremely high and low values of total rain days for persistent rainfall events on inter-decadal timescale

上的水平频散特征。可以看出, 在对流层低 (700 hPa, 图 6a)、中 (500 hPa, 图 6b)、高 (200 hPa, 图 6c) 层位势高度扰动上, 中纬度自大西洋至蒙古地区的正—负—正—负的 Rossby 波列结构清晰。波列结构中的后两个中心对应图 4a–c 中的乌拉尔山东侧的反气旋性环流异常和蒙古地区的气旋性环流异常。波作用量通量显示存在显著的波能东传, 指示乌拉尔山以东的这两个异常环流系统对长江中下游地区降水持续性的年代际异常存在影响, 且他们的形成和维持与自大西洋向下游地区传播的 Rossby 波列有关。总体上, 在对流层上层波扰能量主要来源于中高纬度, 而在对流层低层则存在一些较弱的自低纬度北传的扰动能量的影响。

年际尺度上, 影响长江中下游地区降水的

Rossby 波活动的局地性特征明显。在低层 (图 7a), 波扰能量经由南海向长江中下游地区传播, 在中层 (图 7b) 及高层 (图 7c), 源自贝加尔湖西侧的波扰能量向下游传播至我国东部地区, 影响长江中下游地区降水。

综上所述, 与年代际变化相比, 在年际时间尺度上, 持续性降水事件总降水天数偏多的年份, 波扰能量在对流层低层自低纬地区向北传播更为明显, 但相对而言, 中高纬度影响在年代际尺度上则更清楚些。这些结论提示我们在考虑长江中下游地区降水持续性的长期变化时, 需要更多地考虑中高纬度波扰的作用, 而在考虑降水持续性年际时间尺度上的变化时, 则要关注海洋性大陆地区东北侧部分的扰动。

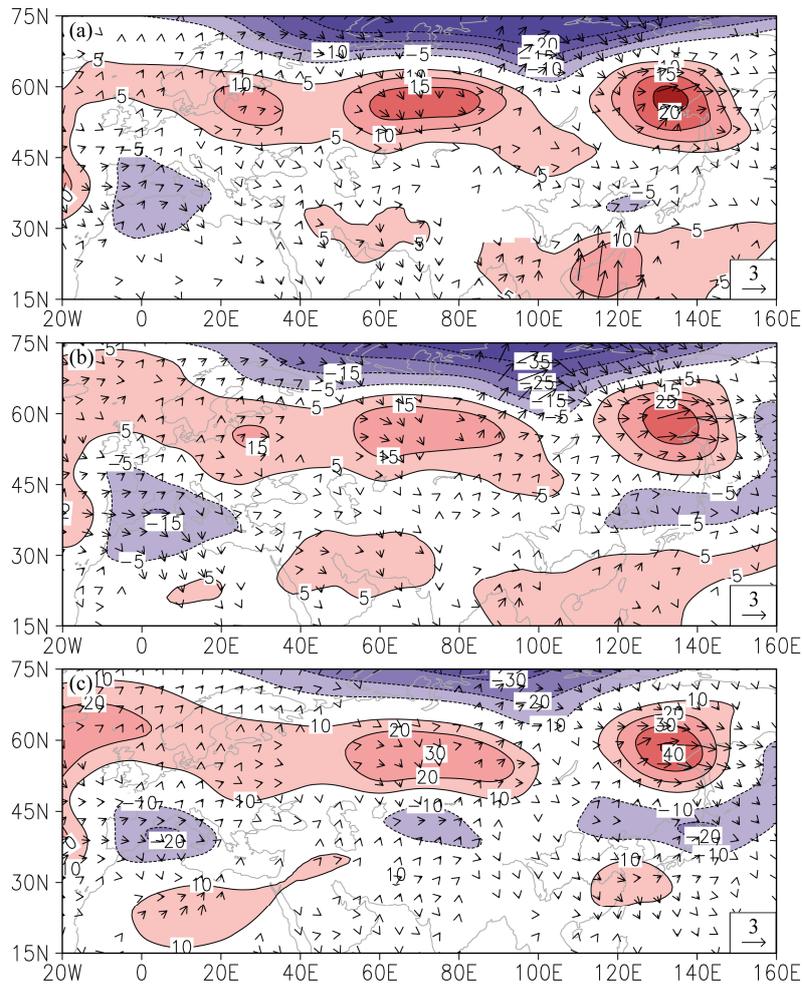


图 7 同图 6，但针对年际时间尺度上的扰动
Fig. 7 Same as in Fig.6, but for those on inter-annual timescales

6 结论与讨论

基于以上分析，全文结果可总结如下：

近 35 年来，在中国东部、华南和长江中下游地区两个区域内的站点降水持续特征存在较为明显的区域性。华南地区显著的降水时段持续时间变长，无雨时段持续时间变短，而长江中下游地区降水时段持续时间变短，无雨时段变长，体现出降水持续特征变弱的趋势。这些与长江中下游地区持续性降水事件在 2000 年前后由多转少的年代际变化有关。

通过比较引起长江中下游地区降水持续性年代际和年际异常的环流型可以发现，二者在我国东南部至南海地区较为相似，而在较高纬度和较低纬度地区则差异明显。相似的是：在对流层中低层存在气流由低纬度的海洋向长江中下游地区辐合、高

层气流由长江中下游地区向低纬度海洋辐合，且在中高层，我国东南部地区均处在显著的反气旋性环流异常控制之下。不同的是：与年代际异常相联系的环流型上，在高纬度地区由低层到高层，在乌拉尔山东侧及蒙古地区分别存在反气旋、气旋性环流异常；低纬度地区，中低层在赤道印度洋地区存在显著的气旋性环流异常。而与年际异常相联系的环流型上，高纬度地区，自低层到高层在贝加尔湖东、西两侧各存在一个反气旋性环流异常；在低纬度的海洋性大陆东北部，低层为向长江中下游地区辐合的气流的源，高层为长江中下游地区向低纬度地区辐合的气流的汇。

与长江中下游地区降水持续特征年代际和年际异常相联系的 Rossby 波能量频散特征上存在较大差别。年代际尺度上，由对流层低层到高层，中纬度自大西洋地区至蒙古地区存在一个正—负—

正一负的波列结构, Rossby 波扰能量沿此波列自西向东的传播十分明显, 从而影响到长江中下游地区, 与此相比, 低纬地区的扰动能量向长江中下游地区的传播不甚明显。而在年际尺度上, 影响长江中下游地区降水的 Rossby 波活动的局地性特征更为明显, 在对流层低层受到低纬地区波扰影响大而在高层则主要受源于贝加尔湖西侧的波扰影响。

要说明的是, 上文仅从大尺度环流和 Rossby 波活动角度, 对比分析了我国长江中下游地区降水持续特征在年代际和年际尺度上变化的成因。有研究表明, 乌拉尔山和鄂霍茨克地区的双阻塞形势及经向的“正一负一正”型的位势高度异常易于引起长江中下游地区发生持续性降水极端事件/暴雨(如: 马音等, 2012; 陈文和杨修群, 2013)。本文的研究表明, 在年际尺度上, 当长江中下游地区降水持续性偏强时, 在贝加尔湖东、西侧各存在一个反气旋性环流异常; 在经向上, 由低纬度到高纬度存在反气旋(我国东南部及南海区域)、气旋(江淮—日本区域), 反气旋性的环流异常(鄂霍茨克地区)。这些异常扰动呈波列状分布, 且能够被波作用量通量的分布所部分地解释。另外, 存在于对流层低层的低纬向中纬度地区的经向波能传播反映了海洋性大陆区域扰动对长江中下游地区的影响。本文的这些从持续降水总日数变化及其相关环流变化角度进行分析所得的结果支持了前人所得的相近的结论。在年代际尺度上, 当长江中下游地区降水持续性偏强时, 在中高纬度, 在乌拉尔山的东、西侧各存在显著的反气旋、气旋性环流异常, 此环流异常与西风带中的 Rossby 波活动联系紧密。在低纬的赤道印度洋地区, 对流层中低层上存在的气旋性环流异常对长江中下游地区降水异常持续亦存在影响。

长江中下游夏季持续降水事件受到包括不同地区海温异常、积雪变化、高原热力异常等异常强迫的影响。ENSO 与长江中下游地区旱涝的发生存在联系, 衰退位相的 ENSO 容易引起长江中下游地区降水偏强, 极端雨日偏多, 从而易于引发洪涝(黄荣辉等, 1998; 李威和翟盘茂, 2009), 而印度洋偶极子及海盆模对我国东部地区旱涝形成亦具有一定的作用(Guan and Yamagata, 2003; Fu et al., 2008; Hu and Duan, 2015)。其他如南海、日本海及北太平洋海温在亦可在不同时间尺度上对长江中下游地区降水异常的产生影响(马音等, 2012;

吕俊梅等, 2014; Si et al., 2015)。然而, 海温异常与长江中下游地区不同时间尺度上降水持续性的关系及其机理如何则仍有待未来进一步研究。

致谢 中国气象局信息中心以及地球科学部南京信息工程大学资料服务中心提供站点逐日降水资料及相关服务, 还使用了 ECMWF 提供的 ERA interim 再分析资料。

参考文献 (References)

- Bai A J, Zhai P M, Liu X D. 2007. Climatology and trends of wet spells in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 88 (3-4): 139-148, doi:10.1007/s00704-006-0235-7.
- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. *大气科学*, 31 (5): 779-792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (5): 779-792, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.03.
- Barlow M. 2011. Influence of hurricane-related activity on North American extreme precipitation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L04705, doi:10.1029/2010GL046258.
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. *J. Climate*, 14 (9): 1959-1976, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2.
- 陈海山, 朱月佳, 刘蕾. 2013. 长江中下游地区冬季极端降水事件与天气尺度瞬变波活动的可能联系 [J]. *大气科学*, 37 (4): 801-814. Chen Haishan, Zhu Yuejia, Liu Lei. 2013. Relationship of synoptic-scale transient eddies and extreme winter precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37 (4): 801-814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12033.
- 陈建洲, 赵强. 2014. 变形 CISK-Rossby 波和低频振荡 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 50 (2): 263-268. Chen Jianzhou, Zhao Qiang. 2014. Modified CISK-Rossby waves and low-frequency oscillations [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 50 (2): 263-268, doi:10.13209/j.0479-8023.2014.049.
- 陈文, 杨修群. 2013. 中国南方洪涝和持续性暴雨的气候背景 [M]. 北京: 气象出版社, 272pp. Chen Wen, Yang Xiuqun. 2013. The Backgrounds of Floods and Persistent Heavy Rainfall over Southern China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 272pp.
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010 [J]. *Climate Res.*, 57: 143-155, doi:10.3354/cr01171.
- Dare R A, Davidson N E, McBride J L. 2012. Tropical cyclone contribution to rainfall over Australia [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (11): 3606-3619, doi:10.1175/MWR-D-11-00340.1.
- 封国林, 杨涵涌, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. *大气科学*, 36 (5): 1009-1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 36 (5): 1009-1026, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220.
- Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, et al. 2008. Interannual variability of summer

- climate of China in association with ENSO and the Indian Ocean dipole [M]// Regional Climate Studies of China. Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, et al., Eds. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 119–154, doi:10.1007/978-3-540-79242-0_4.
- Groisman P Y, Knight R W. 2008. Prolonged dry episodes over the conterminous United States: New tendencies emerging during the last 40 years [J]. *J. Climate*, 21 (9): 1850–1862, doi:10.1175/2007JCLI2013.1.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (10), doi:10.1029/2002GL016831.
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. 2010. Global surface temperature change [J]. *Rev. Geophys.*, 48 (4): RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50 (12): 1661–1671, doi:10.1175/1520-0469(1993)050<1661:RWPOAR>2.0.CO;2.
- Hoskins B J, James I N, White G H. 1983. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40 (7): 1595–1612, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1595:TSPAMF>2.0.CO;2.
- Hu J, Duan A M. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean Sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Climate Dyn.*, 45 (9–10): 2697–2711, doi:10.1007/s00382-015-2503-7.
- Huang Gang. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41–52, doi:10.1007/BF02915679.
- Huang Danqing, Zhu Jian, Kuang Xuyuan. 2011. Decadal variation of different durations of continuous Meiyu precipitation and the possible cause [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (4–5): 424–431, doi:10.1007/s11434-010-4241-x.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 300–313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 300–313, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.02.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Wang Lin, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (5): 910–942, doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- 江志红, 常奋华, 丁裕国. 2013. 基于马尔科夫链转移概率极限分布的降水过程持续性研究 [J]. *气象学报*, 71 (2): 286–294. Jiang Zhihong, Chang Fenhua, Ding Yuguo. 2013. An investigation into continuous precipitation based on the Markov transition probability limit distribution [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 71 (2): 286–294, doi:10.11676/qxxb2013.028.
- 金大超, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 近 50 年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关 [J]. *大气科学*, 34 (5): 947–961. Jin Dachao, Guan Zhaoyong, Cai Jiayi, et al. 2010. Anomalous summer rainfall patterns in East China and the related teleconnections over recent 50 years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (5): 947–961, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.10.
- Jin D C, Guan Z Y, Tang W Y. 2013. The extreme drought event during winter–spring of 2011 in East China: Combined influences of teleconnection in midhigh latitudes and thermal forcing in Maritime Continent region [J]. *J. Climate*, 26 (20): 8210–8222, doi:10.1175/JCLI-D-12-00652.1.
- Lau W K M, Zhou Y P, Wu H T. 2008. Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D23): D23113, doi:10.1029/2008JD009963.
- 李崇银. 1990. 赤道以外热带大气中 30~50 天振荡的一个动力学研究 [J]. *大气科学*, 14 (1): 83–92. Li Chongyin. 1990. Dynamical study on 30–50 day oscillation in the tropical atmosphere outside Equator [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 14 (1): 83–92, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.11.
- 李明刚, 管兆勇, 韩洁, 等. 2012. 近 50a 华东地区夏季极端降水事件的年代际变化 [J]. *大气科学学报*, 35 (5): 591–602. Li Minggang, Guan Zhaoyong, Han Jie, et al. 2012. Interdecadal changes of summertime precipitation extremes in East China in recent five decades [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 35 (5): 591–602, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.05.009.
- 李威, 翟盘茂. 2009. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (6): 336–342. Li Wei, Zhai Panmao. 2009. Relationship between ENSO and frequency of extreme precipitation days in China [J]. *Adv. Climate Change Res. (in Chinese)*, 5 (6): 336–342, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2009.06.004.
- 林学椿, 张素琴. 2000. 1998 年中国特大洪涝时期的环流特征 [J]. *地球物理学报*, 43 (5): 607–615. Lin Xuechun, Zhang Suqin. 2000. Characteristics of the circulation during the catastrophic flood period over China in 1998 [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 43 (5): 607–615, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2000.05.004.
- 刘式适, 王继勇. 1992. Wave-CISK 的一个斜压半地转模式和低频振荡 [J]. *气象学报*, 50 (4): 393–402. Liu Shikuo, Wang Jiyong. 1992. A baroclinic semi-geostrophic model using the Wave-CISK theory and low-frequency oscillation [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 50 (4): 393–402.
- Llano M P, Penalba O C. 2011. A climatic analysis of dry sequences in Argentina [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (4): 504–513, doi:10.1002/joc.2092.
- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡 [J]. *气象学报*, 54 (6): 730–736. Lu Er, Ding Yihui. 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang–Huaihe River basin [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 54 (6): 730–736, doi:10.11676/qxxb1996.075.
- 陆尔, 丁一汇, 李月洪. 1994. 1991 年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动 [J]. *应用气象学报*, 5 (3): 266–274. Lu Er, Ding Yihui, Li Yuehong. 1994. Isentropic potential vorticity analysis and cold air activity during the period of excessively heavy rain over Changjiang–Huaihe River basin in 1991 [J]. *Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese)*, 5 (3): 266–274.
- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因 [J]. *大气科学*, 38 (4): 782–794. Lü Junmei, Zhu Congwen, Ju Jianhua, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 38 (4): 782–794, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227.

- 马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 2012. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系 [J]. 大气科学, 36 (2): 397–410.
- Ma Yin, Chen Wen, Fong Soikun, et al. 2012. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (2): 397–410, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11050.
- 梅士龙, 管兆勇. 2008. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流域梅雨的关系 [J]. 大气科学, 32 (6): 1333–1340. Mei Shilong, Guan Zhaoyong. 2008. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River–Huaihe River valley [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (6): 1333–1340, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.08.
- 梅士龙, 管兆勇. 2009. 1998 年长江中下游梅雨期间对流层上层斜压波包的传播 [J]. 热带气象学报, 25 (3): 300–306. Mei Shilong, Guan Zhaoyong. 2009. Propagation of baroclinic wave packets in upper troposphere during the Meiyu period of 1998 over middle and lower reaches of Yangtze River valley [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 25 (3): 300–306, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.03.007.
- Nogueira R C, Keim B D. 2010. Annual volume and area variations in tropical cyclone rainfall over the eastern United States [J]. J. Climate, 23 (16): 4363–4374, doi:10.1175/2010JCLI3443.1.
- 平凡, 唐细坝, 高守亭, 等. 2014. 长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征比较 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (4): 766–782. Ping Fan, Tang Xiba, Gao Shouting, et al. 2014. A comparative study of the atmospheric circulations associated with rainy-season floods between the Yangtze and Huaihe River basins [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (7): 1464–1479, doi:10.1007/s11430-013-4802-3.
- Qian W, Lin X. 2005. Regional trends in recent precipitation indices in China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 2005, 90 (3–4): 193–207, doi:10.1007/s00703-004-0101-z.
- Schmidli J, Frei C. 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century [J]. Int. J. Climatol., 25 (6): 753–771, doi:10.1002/joc.1179.
- 沈柏竹, 张世轩, 杨涵涓, 等. 2012. 2011 年春季夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析 [J]. 物理学报, 61 (10): 109202. Shen Baizhu, Zhang Shixuan, Yang Hanwei, et al. 2012. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011 [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 61 (10): 109202, doi:10.7498/aps.61.109202.
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中后期演变过程的影响 [J]. 大气科学, 33 (5): 1087–1100. Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2009. Impacts of mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid- and late summer [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 33 (5): 1087–1100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.18.
- Si D, Hu Z Z, Kumar A, et al. 2015. Is the interdecadal variation of the summer rainfall over eastern China associated with SST? [J]. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-015-2574-5.
- Singh N, Ranade A. 2010. The wet and dry spells across India during 1951–2007 [J]. J. Hydrometeor., 11 (1): 26–45, doi:10.1175/2009JHM1161.1.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. J. Atmos. Sci., 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- 谭本旭, 潘旭辉. 2002. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝灾害分析 [J]. 南京大学学报(自然科学), 38 (3): 354–364. Tan Benkui, Pan Xuhui. 2002. Baroclinic waves of Northern Hemisphere and Yangtze River flood in the summer of 1998 [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 38 (3): 354–364, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2002.03.010.
- Tang Yanbing, Gan Jingjing, Zhao Lu, et al. 2006. On the climatology of persistent heavy rainfall events in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 23 (5): 678–692, doi:10.1007/s00376-006-0678-x.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- 陶诗言, 卫捷, 梁丰, 等. 2010. Rossby 波的下流效应引发我国高影响天气的分析 [J]. 气象, 36 (7): 81–93. Tao Shiyan, Wei Jie, Liang Feng, et al. 2010. Analysis of high impact weather induced by the downstream effect of Rossby waves [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36 (7): 81–93.
- Tolika K, Maheras P. 2005. Spatial and temporal characteristics of wet spells in Greece [J]. Theor. Appl. Climatol., 81 (1–2): 71–85, doi:10.1007/s00704-004-0089-9.
- 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏季中国的持续异常天气 [J]. 气象学报, 52 (3): 308–320. Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high—On the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 52 (3): 308–320, doi:10.11676/qxxb1994.039.
- Wu Hui, Zhai Panmao. 2013. Changes in persistent and non-persistent flood season precipitation over South China during 1961–2010 [J]. Acta Meteor. Sinica, 27 (6): 788–798, doi:10.1007/s13351-013-0613-x.
- 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 2006. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转 [J]. 科学通报, 51 (14): 1717–1724. Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2006. Large-scale atmospheric singularities and summer long-cycle droughts–floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (16): 2027–2034, doi:10.1007/s11434-006-2060-x.
- Yang F L, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures [J]. Int. J. Climatol., 24 (13): 1625–1644, doi:10.1002/joc.1094.
- 于文勇, 李建, 宇如聪. 2012. 中国地区降水持续性的季节变化特征 [J]. 气象, 38 (4): 392–401. Yu Wenyong, Li Jian, Yu Rucong. 2012. Analyses of seasonal variation characteristics of the rainfall duration over China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 38 (4): 392–401, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.4.002.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18

- (7): 1096–1108, doi:10.1175/JCLI-3318.1.
- Zhang Q, Singh V P, Li J F, et al. 2011. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D23): D23106, doi:10.1029/2011JD016088.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 27 (6): 1018–1030, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.06.
- 张小玲, 陶诗言, 卫捷. 2006. 20 世纪长江流域 3 次全流域灾害性洪水事件的气象成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 669–682. Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. An analysis on the basin wide catastrophic floods in the Yangtze River during the 20th century [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 11 (6): 669–682, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.06.01.
- Zhang Z X, Zhang Q, Jiang T. 2007. Changing features of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1961–2002 [J]. *J. Geograph. Sci.*, 17 (1): 33–42, doi:10.1007/s11442-007-0033-x.
- Zhu C W, Nakazawa T, Li J P, et al. 2003. The 30–60 day intraseasonal oscillation over the western North Pacific Ocean and its impacts on summer flooding in China during 1998 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (18), doi:10.1029/2003GL017817.
- Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. 2010. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (6): L06704, doi:10.1029/2010GL042468.
- Zolina O, Simmer C, Belyaev K, et al. 2013. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years [J]. *J. Climate*, 26 (6): 2022–2047, doi:10.1175/JCLI-D-11-00498.1.